

На правах рукописи



Брагин Дмитрий Михайлович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ПЕРЕНОСНЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С
УПОРЯДОЧЕННОЙ МАКРОСТРУКТУРОЙ**

2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара, 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Промышленная теплоэнергетика».

Научный руководитель – **Еремин Антон Владимирович**,
доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», начальник молодёжной лаборатории «Тепловые процессы в химической технологии (ТЕРМОХИМ)», г. Самара

Официальные оппоненты: **Бирюков Алексей Борисович**,
доктор технических наук, профессор, проректор ДонНТУ, заведующий кафедрой «Техническая теплофизика» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

Колесник Сергей Александрович,
доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения» ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск

Защита диссертации состоится 01 октября 2026 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.310.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел.: (843)519-42-58.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просьба направлять по адресу: 420066, Республика Татарстан, ул. Красносельская, д. 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.03, Svetlana-zag@bk.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте <https://kgeu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Борисова Светлана Дмитриевна

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Согласно указам Президента Российской Федерации от 28.02.2024 г. № 145 и от 18 июня 2024 г. № 529, к приоритетам и перспективам научно-технического развития, а также к важнейшим наукоёмким технологиям относится повышение эффективности использования энергетических ресурсов, разработка высокотехнологичной продукции, создание новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками. Разработка материалов с заданными свойствами открывает возможности для проектирования и создания новой высокотехнологичной продукции.

Современное развитие энергетики, теплотехнологий и систем терморегулирования характеризуется возрастающими требованиями к эффективности процессов передачи, преобразования и использования теплоты. В этой связи ключевое значение приобретают задачи интенсификации процессов тепло- и массообмена, а также совершенствования методов расчёта и оптимизации параметров теплотехнического оборудования.

Одним из перспективных направлений решения указанных задач является использование материалов с управляемыми теплофизическими и гидродинамическими характеристиками, позволяющих целенаправленно воздействовать на интенсивность теплообмена и структуру течения. Разработка методов определения эффективных свойств таких материалов и получение зависимостей, связывающих структуру и характеристики переноса, являются актуальными научными задачами теплотехники.

В настоящее время активно развиваются подходы к созданию материалов с заранее заданными свойствами: механическими, электрическими, гидродинамическими и теплофизическими. При этом особое внимание привлекают материалы, основанные на трижды периодических минимальных поверхностях (TPMS, от англ. Triply periodic minimal surface). Свойства материала, основанного на упорядоченной структуре TPMS, можно изменять, модифицируя топологию или геометрические размеры элементарной ячейки. Заранее заданные свойства материалов на основе TPMS уже открывают новые возможности в области медицины для тканевой инженерии, в химической отрасли и др.

Особого внимания заслуживает внедрение структур TPMS в теплообменное оборудование. Экспериментальные данные демонстрируют повышение эффективности теплообменников TPMS по сравнению с термодинамически эквивалентными противоточными теплообменниками. Кроме того, исследование теплопроводящих свойств материалов на основе TPMS подчеркивает их практический потенциал для

улучшения теплопроводности материалов с фазовым переходом в системах хранения тепловой энергии и системах терморегулирования.

В настоящей диссертации предложены подходы определения теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной структурой, а также получения обобщённых зависимостей свойств TPMS-материалов от их геометрических параметров. Разработанные зависимости позволяют инженерам и конструкторам проектировать материалы с заранее заданными свойствами в соответствии с требованиями конкретных прикладных задач. Это способствует сокращению времени между получением новых научных результатов и созданием технологий и высокотехнологичной продукции, что соответствует положениям Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

Цель работы: разработка методов определения теплофизических свойств и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой на основе анализа и обобщения результатов имитационного моделирования и натуральных экспериментов.

Задачи исследования:

1. Разработать методы генерации и обработки твердотельных САД-моделей пористых материалов с упорядоченной макроструктурой. Реализовать алгоритмы формирования геометрических моделей пористых материалов на основе TPMS для последующего численного и экспериментального исследования.

2. Исследовать теплофизические свойства и гидродинамические характеристики пористых материалов на основе TPMS путем численных и натуральных экспериментов процессов переноса.

3. Обобщить зависимости теплофизических свойств и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой от геометрических параметров элементарной ячейки и свойств материала каркаса, представив результаты в форме, удобной для инженерных расчётов и практического применения.

4. Разработать новые конструкции оребрения и рекуперативных теплообменных устройств на основе TPMS-материалов. Выполнить численное и натурное исследование процессов тепло- и массообмена в указанных теплообменных устройствах.

5. Провести комплекс натуральных экспериментов по исследованию тепло- и гидродинамических характеристик TPMS материалов с целью верификации результатов, полученных численными методами.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника»:

п.1) Теплофизические свойства чистых веществ и их смесей, включая флюидонасыщенные горные породы, в широкой области параметров состояния; связи между строением веществ и их феноменологическими свойствами; методы расчета термодинамических и переносных свойств в различных агрегатных состояниях; п.5) Научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты. Процессы тепло- и массообмена в оборудовании, предназначенном для производства, преобразования, передачи и потребления теплоты; п.8) Новые конструкции теплопередающих и теплоиспользующих установок и оборудования, обладающих улучшенными эксплуатационными и техникоэкономическими характеристиками. Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров, использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем.

Научная новизна:

1. Разработаны новые подходы определения теплофизических свойств и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой на основе TPMS, отличающиеся совместным использованием результатов численного моделирования и натуральных экспериментов, методов гомогенизации, концепции репрезентативной элементарной ячейки и нормализации по основным теплофизическим параметрам материала каркаса. Предложенные подходы обеспечивают корректное обобщение экспериментальных и расчётных данных и расширяют возможности использования TPMS-структур различной топологии и масштаба.

2. Впервые получены обобщённые зависимости эффективных теплофизических и гидродинамических свойств пористых TPMS-материалов от геометрических параметров элементарной ячейки и свойств материала каркаса на основе решения обратных задач теплопроводности и гидродинамики. Полученные зависимости формируют научные основы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты при использовании TPMS-материалов.

3. Разработаны и исследованы новые конструкции теплообменных и теплоиспользующих устройств на основе TPMS-структур. Установлено влияние топологии TPMS-структур на формирование полей скорости, давления и температуры, а также на локальные зоны интенсивного теплообмена и области повышенного гидравлического сопротивления, что позволило определить области применения различных TPMS-топологий в теплообменном оборудовании.

4. Предложено и обосновано модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля для расчёта гидравлических потерь давления в пористых материалах на основе упорядоченных структур, учитывающее параметры потока и геометрические

характеристики структуры. В отличие от классических подходов, предложенное уравнение позволяет адекватно описывать экспериментально наблюдаемое падение давления в TPMS структурах.

Положения, выносимые на защиту:

1 Подходы определения теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой, основанной на совместном анализе и обобщении результатов численного моделирования и натуральных экспериментов. Подходы включают метод гомогенизации, концепцию репрезентативной элементарной ячейки и нормализацию теплофизических характеристик по теплопроводности материала каркаса.

2. Обобщенные зависимости эффективной теплопроводности TPMS-структур от геометрических параметров элементарной ячейки и теплофизических свойств материала каркаса. Зависимости позволяют создавать TPMS-материалы с заданной эффективной теплопроводностью.

3. Результаты экспериментального и численного исследования полей скорости и давления в TPMS-структурах, показавшие определяющее влияние топологии элементарной ячейки на локальные ускорения потока, формирование вихревых зон и гидравлического сопротивления.

4. Модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля для расчёта гидравлических потерь давления в пористых материалах на основе TPMS, учитывающее параметры потока и геометрические характеристики структуры. Уравнение описывает перепад давления в широком диапазоне пористостей и верифицировано результатами численных и натуральных экспериментов.

5. Алгоритм формирования оребрения и теплообменных устройств на основе TPMS-структур, для интенсификации теплопереноса за счёт увеличения удельной поверхности теплообмена и формирования сложных трёхмерных полей скорости. Безразмерные комплексные коэффициенты теплопередачи и потерь давления в различных TPMS-структурах.

Достоверность результатов работы исследования подтверждается сопоставлением полученных данных с реальными теплофизическими процессами; сравнением численных решений, полученных в диссертации, с экспериментальными данными и результатами, опубликованными другими исследователями; непротиворечивостью полученных выводов классическим физическим законам и современным представлениям о механизмах переноса тепла и массы.

Практическая значимость работы заключается в разработке подходов к проектированию оребренных поверхностей и компактных теплообменных устройств на

основе пористых материалов с упорядоченной макроструктурой, обеспечивающих интенсификацию процессов тепло- и массообмена за счёт увеличения удельной поверхности теплообмена и формирования сложной пространственной структуры течения теплоносителя. Полученные в работе обобщённые зависимости эффективной теплопроводности и гидравлического сопротивления TPMS-материалов от геометрических параметров элементарной ячейки и свойств материала каркаса представлены в форме, удобной для инженерного применения, что позволяет создавать материалы с заранее заданными свойствами, что соответствует перечню важнейших наукоемких технологий (указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529, п. 23), сокращает время между получением новых знаний и внедрением технологий и продукции, а также способствует обеспечению неразрывной взаимосвязи между научно-технологическим и промышленным потенциалом страны, согласно стратегии НТР (п. 16.а, п. 27.а).

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы частично используются в учебном процессе Самарского государственного технического университета в лекционных курсах для студентов бакалавриата направления подготовки 13.03.01. «Теплоэнергетика и теплотехника», а также в расчетно-проектной практике предприятий ООО «Котел Маркет» и ООО «РОСКО».

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на следующих конференциях: Международная конференция «The 3rd Asian Conference on Thermal Sciences» г. Шанхай, 2024 г; международная конференция «International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency» г. Липецк, 2021, 2022, 2023, 2025 г.; международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг», г. Сочи, 2022 г.;

Также результаты работы докладывались на научных семинарах кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Самарского государственного технического университета в 2022-2026 гг.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-10044 и №21-79-00047); министерства науки и образования (стипендия Президента Российской Федерации для аспирантов 2023-2026 гг.; конкурс денежных выплат молодым ученым и конструкторам, работающим в Самарской области 2023-2026 гг.); тема № FSSE-2025-0006 в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета (создание новых молодежных лабораторий); ФГБОУ ВО СамГТУ (грант аспиранта 2023-2026 гг.)

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 20 печатных работах, из них 6 статей в журналах, входящих в Scopus (квартиль 1); 8 статей в

журналах, индексируемые ВАК, из которых 5 по научной специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника»; 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Полный список трудов в рамках диссертации составляет 50 работ.

Личный вклад автора.

В работах [1-6, 9-12, 16, 17] диссертанту принадлежат разработка методологии исследования, проведение исследования, обработка и анализ результатов, валидация полученных данных, выполнение основного объема вычислений, оформление визуальных материалов, написание исходных текстов научных публикаций и их научное редактирование, формулировка выводов.

В работах – [7, 8, 13, 14, 18-20] ряд этапов работы, включая проведение исследования, анализ результатов и подготовку визуальных материалов, выполнялся диссертантом в равной степени совместно с соавторами. В работе [15] диссертанту принадлежит подготовка и проведение натурного исследования.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, приложений; изложена на 198 страницах основного машинописного текста и 6 страницах приложений, содержит 76 рисунков. Список использованной литературы включает 241 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы. Представлены научная новизна и положения, выносимые на защиту, показана практическая значимость полученных результатов, связанных с исследованием теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой. Приведены сведения об апробации результатов исследования, публикациях автора, а также структура диссертационной работы.

В первой главе диссертации выполнен анализ отечественных и зарубежных литературных источников, посвящённых вопросам интенсификации тепло- и массообмена, разработке компактных теплообменных устройств, а также исследованию теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой. Основное внимание уделено анализу исследований, связанных с применением материалов на основе трижды периодических минимальных поверхностей (TPMS), и оценке перспектив их использования в теплообменном оборудовании, системах терморегулирования и тепловой защиты. На рисунке 1 представлены некоторые виды TPMS топологий, используемых в рамках диссертационной работы.

Рассмотрены основные научные подходы и модели, используемые для описания теплопереноса в пористых средах. Показано, что применимость и точность существующих моделей в значительной степени зависят от геометрии порового пространства, топологии структуры и масштаба рассмотрения. Несмотря на значительное количество исследований, вопросы обобщённого описания теплофизических и гидродинамических свойств TPMS структур остаются недостаточно изученными, что определяет актуальность и задачи настоящего диссертационного исследования.

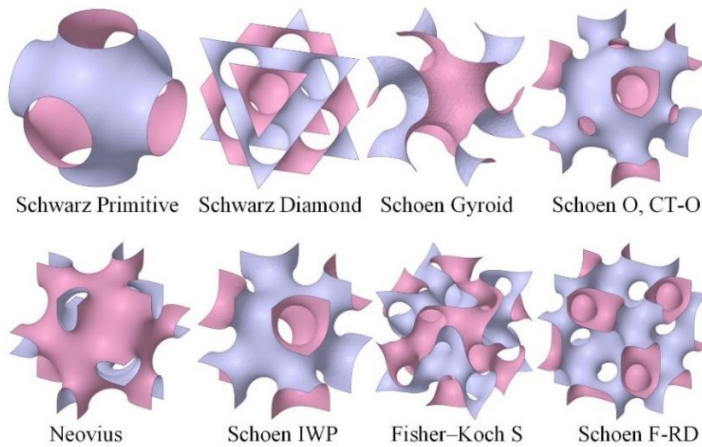


Рис. 1. Трижды периодические минимальные поверхности нулевой толщины

на основе обобщения результатов численных и экспериментальных исследований получены зависимости эффективной теплопроводности TPMS-материалов от геометрических параметров структуры и теплопроводности материала каркаса.

Общий принцип формирования CAD-геометрии TPMS-материала схематично представлен на рисунке 2.

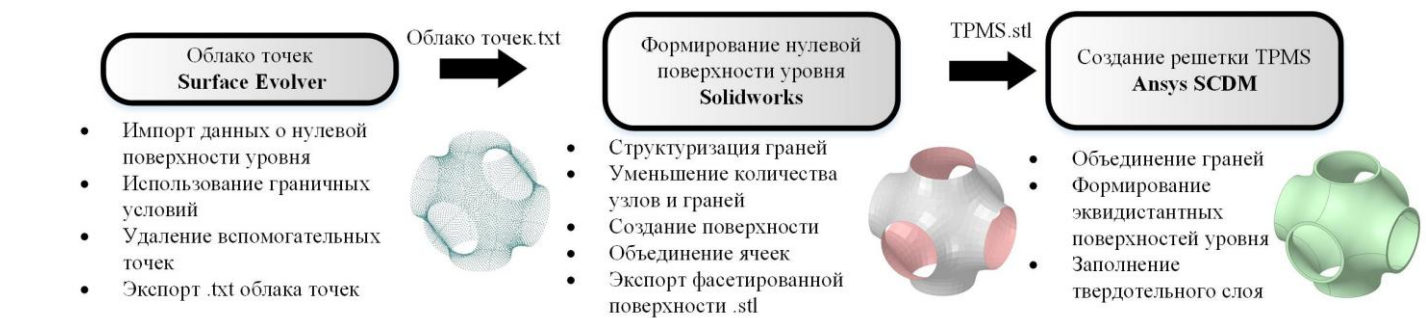


Рис. 2. Схема создания геометрии TPMS в системах САПР

На рисунке 3. представлена нулевая поверхность уровня Schoen's IWP для одной элементарной ячейки и две эквидистантные поверхности уровня, смещённые относительно нулевой поверхности на расстояние $\pm \delta/2$. Пространство, ограниченное двумя эквидистантными поверхностями уровня, образует твердотельную толщину решетки. Материал на основе TPMS формируется путем последовательного объединения элементарных ячеек в трех взаимно перпендикулярных осях декартовой

системы координат. Для удобства построения и обработки моделей используется элементарная ячейка с периодом поверхности уровня a . В таком случае, эквидистантные поверхности для одного из типов TPMS - Schoen's IWP описываются уравнением:

$$2\left[\cos\frac{2\pi x}{a}\cos\frac{2\pi y}{a}+\cos\frac{2\pi y}{a}\cos\frac{2\pi z}{a}+\cos\frac{2\pi z}{a}\cos\frac{2\pi x}{a}\right]-\left[\cos\frac{4\pi x}{a}+\cos\frac{4\pi y}{a}+\cos\frac{4\pi z}{a}\right]=\pm\frac{\delta}{2}\quad (1)$$

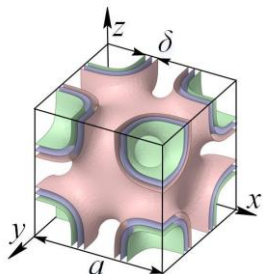


Рис. 3. Формирование геометрии элементарной ячейки по поверхностям уровня: нулевая и две эквидистантные поверхности уровня

Для описания процессов переноса и прогнозирования эффективных свойств структуры используются два характерных геометрических параметра поверхности уровня (a) и параметра смещения двух уравнений поверхности уровня (δ). Данные параметры полностью определяют пористость, удельную поверхность и топологические характеристики структуры, что позволяет использовать их в качестве независимых переменных при анализе процессов теплопереноса. Объединение этих параметров возможно с использованием безразмерной относительной толщины:

$$\chi = \frac{\delta}{a}\quad (2)$$

Относительная толщина остается постоянной при простом масштабировании структуры и может быть использована для изучения тепло- и массопереноса в структурах TPMS.

Для изучения свойств композитных и пористых структур используется понятие репрезентативной элементарной ячейки (RUC, от английского «Representative Unit Cell»). Совместно с численными методами и методом RUC используются методы усреднения теплофизических характеристик по ортогональным сечениям элементарной ячейки. Для исследования тепловых свойств пористого материала ячейка элементарная ячейка TPMS была заменена эквивалентным гомогенизированным кубом с длинами ребер, равными a и эквивалентными теплофизическими свойствами. Коэффициент эффективной теплопроводности пористых материалов согласно гомогенизированной модели стационарного режима переноса тепла при граничных условиях первого рода по закону Фурье описывается уравнением:

$$\lambda_{эфф} = \frac{-\bar{q}_r S_r}{a\Delta T},\quad (3)$$

где \bar{q}_r – тепловой поток через TPMS, Вт м⁻²; S_r – площадь сечения, м²; ΔT – разность температур между противоположными гранями ячейки в направлении переноса энергии, °C. Остальные грани и поверхности структуры в рамках моделирования считаются адиабатными.

В пористых материалах на основе TPMS можно выделить три основные плоскости симметрии: XY, XZ, YZ (рис. 4.а, 4.б). Для большинства TPMS материалов плоскости симметрии XY, XZ, YZ идентичны, т.к. при повороте геометрии на 90 градусов вокруг оси, расположенной на пересечении плоскостей XY, XZ, YZ , происходит полное совпадение всех точек геометрии.

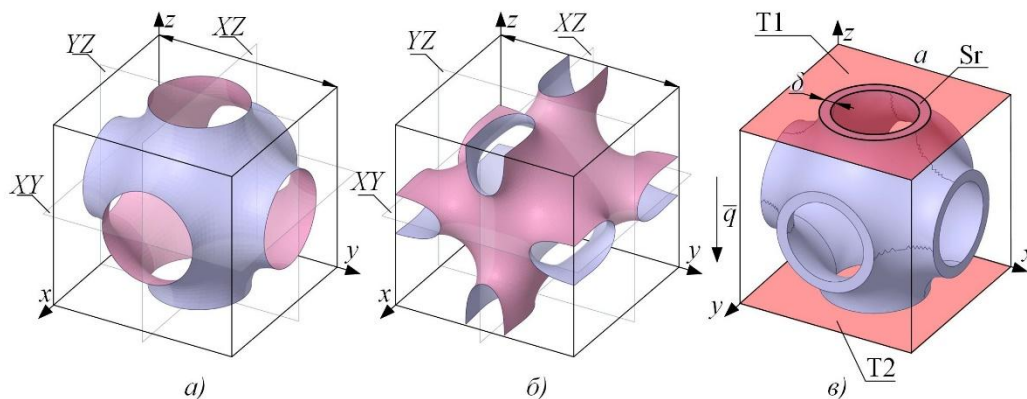


Рис. 4. а) Плоскости симметрии TPMS типа Primitive; б) поверхность типа Schoen's I-WP(R); в) граничные условия на примере ячейки типа Primitive

Для материалов, основанных на TPMS с тремя идентичными плоскостями, в частности материал на основе поверхности типа Primitive, достаточно рассмотреть процесс переноса в одном из направлений симметрии, поскольку изменение направления будет приводить к решению той же задачи.

Однако некоторые TPMS материалы обладают несколькими отличающимися плоскостями симметрии. Так на рисунке 4.б представлена поверхность Schoen's I-WP(R), для которой плоскости XY, XZ идентичны и отличаются от плоскости YZ . Таким образом, можно сказать, что свойства материала на основе Schoen's I-WP(R) являются ортотропными, т. е. $\lambda_y = \lambda_z$ но отличаются от λ_x . В таком случае необходимо аналогичное исследование для определения других элементов тензора теплопроводности в главной диагонали.

Результаты численного моделирования теплопереноса с учетом относительной толщины χ , и нормализации по теплопроводности исходного материала λ_m обобщены в виде графиков, представленных на рис. 5. Результаты согласуются с результатами собственного, а также независимого эксперимента. В таком случае эффективная теплопроводность TPMS конструкции может быть описана в следующем уравнении:

$$\lambda_{эфф} = \beta \lambda_m \chi, \quad (4)$$

где β – константа, учитывающая форму пор и их расположение в структуре TPMS. " β " для конструкций TPMS представлены в таблице 1.

Используя выражение 4, возможно прогнозирование теплофизических свойств с учетом теплопроводности исходного материала и относительной толщины структуры. Введение коэффициента β позволяет учитывать влияние топологии порового пространства, что отличает предложенный подход от классических моделей эффективной теплопроводности.

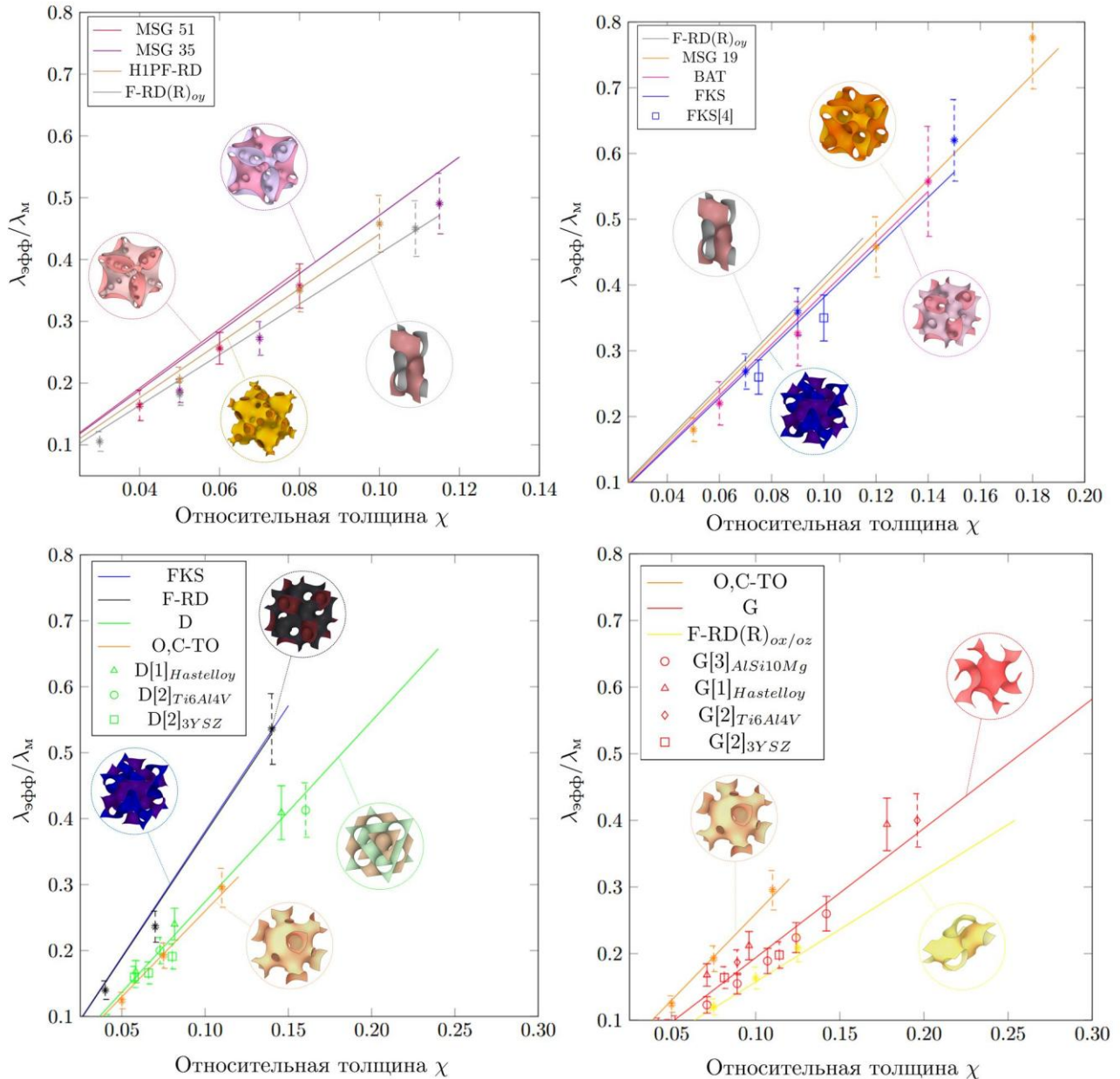


Рис. 5. Эффективная теплопроводность конструкций на основе TPMS из материалов PHP, Hastelloy-X¹, Ti6Al4V¹, 3YSZ², AlSi10Mg³ и др⁴., полученная в ходе собственного CFD моделирования и натурального эксперимента

¹ Catchpole-Smith S. et al. Thermal conductivity of TPMS lattice structures manufactured via laser powder bed fusion //Additive Manufacturing. – 2019. – Т. 30. – С. 100846.

² Zhou Z. et al. Effective Thermal Conductivity and Heat Transfer Characteristics of a Series of Ceramic Triply Periodic Minimal Surface Lattice Structure //Advanced Engineering Materials. –2023. . – Т. 25. – №. 17. – С. 2300359.

³ Pan C., Tang H., Yue X. Minimum cross-section dominated effective thermal conductivity in morphology-modulated gyroid lattices //International Journal of Thermal Sciences. – 2026. – Т. 221. – С. 110468.

⁴ Abueidda D. W. et al. Effective conductivities and elastic moduli of novel foams with triply periodic minimal surfaces //Mechanics of Materials. – 2016. – Т. 95. – С. 102-115.

Таблица 1. Коэффициент β

TPMS	MSG 51	MSG 35	H1P,FRD	MSG 19	BAT	FKS	FRD	D	O,СТО	RHO	N	IWP	G	P	LTA
β	4.8	4.56	4.41	4.0	3.88	3.81	3.76	2.74	2.6	2.52	2.45	2.4	1.94	1.6	1.15

В третьей главе диссертации представлены результаты численного и экспериментального исследования гидродинамических и теплообменных характеристик пористых TPMS-материалов. Рассмотрены особенности течения теплоносителя в TPMS-структурах, включая распределения скоростей, давления и характерные зоны локального ускорения и замедления потока. Разработано модифицированное уравнения Хагена-Пуазейля для определения потерь давления потока при прохождении через пористую вставку, учитывающее геометрические параметры TPMS-структуры и характеристики потока. Показано, что предложенная зависимость обеспечивает более точное описание гидравлических потерь по сравнению с классическими моделями, применяемыми для пористых сред. Показано, что сложная топология порового пространства оказывает существенное влияние на структуру течения и формирование гидравлических потерь.

Для дальнейших исследований необходимо заполнение межпорового пространства жидкостью, как показано на рисунке 6.

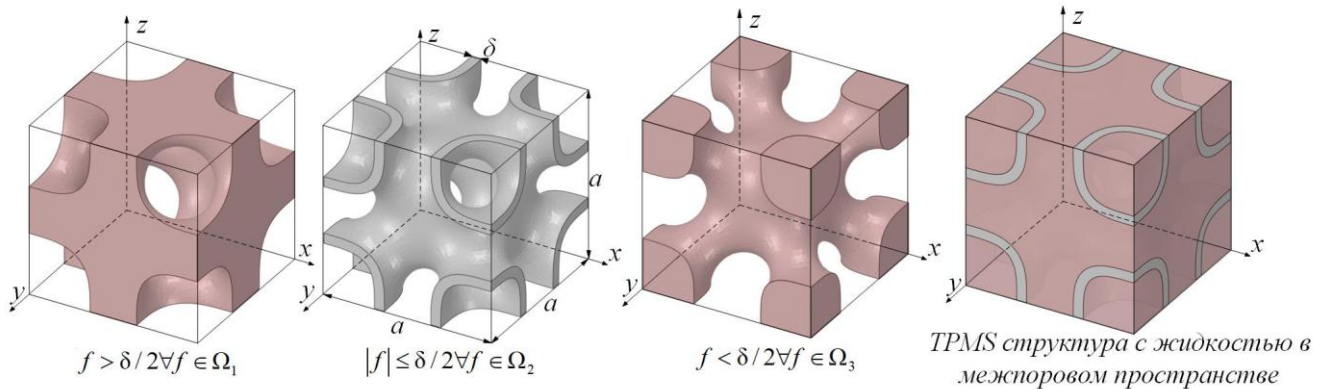


Рис. 6. Формирование геометрии элементарной ячейки и межпористого пространства

На рисунке 7. представлены векторные поля распределения скорости потока в TPMS-структурах типа FKS, IWP, N и P. В зависимости от геометрических параметров структуры формируются зоны интенсивного перемешивания и локальной турбулизации потока, что способствует интенсификации процессов теплообмена, но одновременно приводит к росту гидравлического сопротивления.

Во вставке IWP и N внутри ячеек наблюдаются зоны обратного течения и, соответственно, дополнительная турбулизация потока. Обратные течения вызваны ударами основного потока в стенку ячейки, что приводит к дополнительным потерям давления.

Распределение перепада давления вдоль осевого направления для различных TPMS топологий показывает, что потери давления имеют выраженный неравномерный характер и дифференцируются при переходе потока из одной ячейки в другую. В связи с этим целесообразно рассматривать общее падение давления в пористой вставке как сумму потерь давления на элементарных ячейках по ходу движения потока (см. рис. 8).

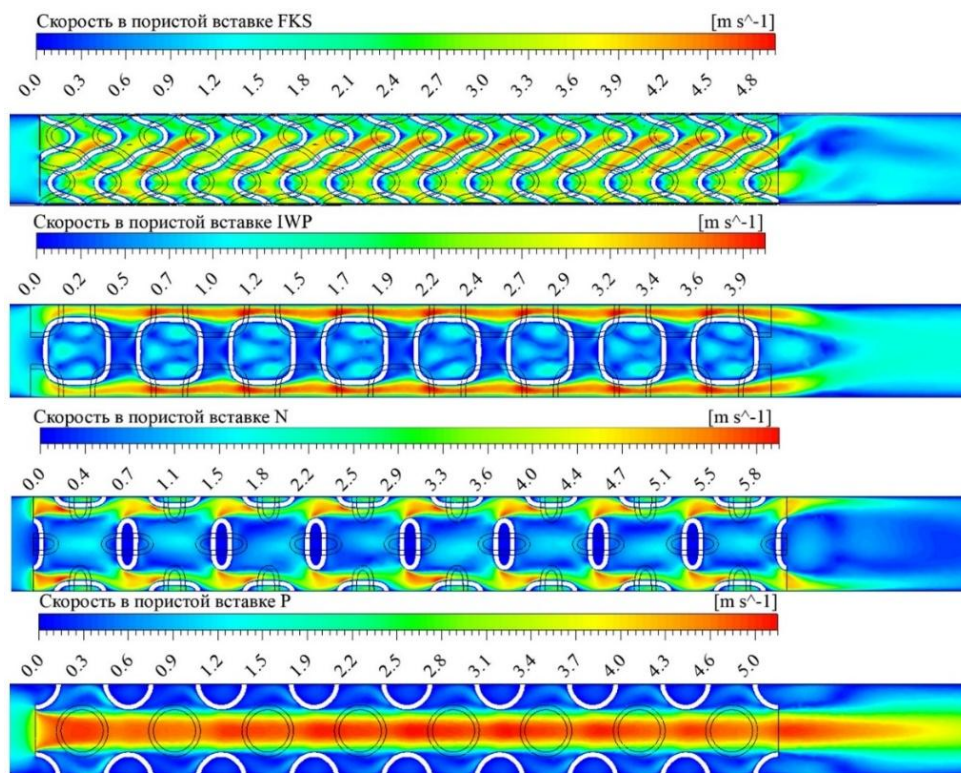


Рис. 7. Векторное поле распределения скорости потока в TPMS-материалах при скорости воздуха на входе 0,9 м/с

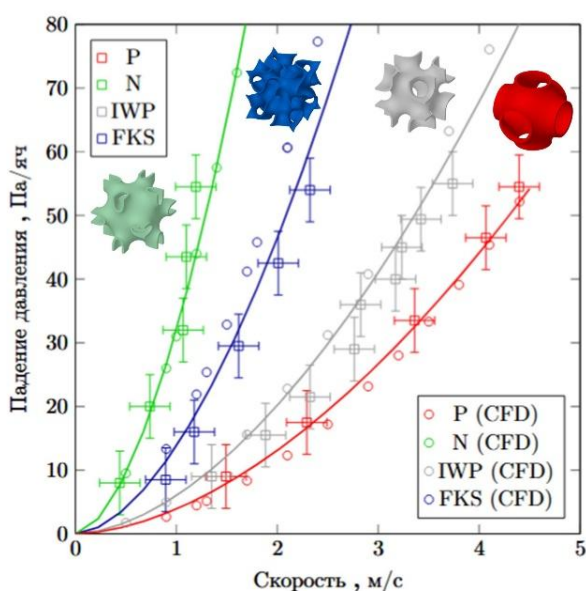


Рис. 8. Падение давления на 1 ячейку TPMS от скорости потока при численных и натуральных экспериментах

Для исследования потерь давления в пористых средах с упорядоченной структурой, в частности в структурах TPMS, может использоваться уравнение Хагена-Пуазейля совместно с модификациями⁵ и учетом сферичности ϕ твердой частицы. Этот метод может быть использован при допущении, что твердая фаза в пористой структуре представлена сферами. Таким образом, TPMS - ячейки были представлены в виде сферы с эквивалентным объемом.

⁵ Wu J., Yu B., Yun M. A resistance model for flow through porous media //Transport in Porous Media. – 2008. – Т. 71. – №. 3. – С. 331-343.

Диаметр частицы сферы рассчитывается следующим образом:

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{6V_s}{\pi}}, \quad (5)$$

где D_p – диаметр частицы, м; V_s – объем твердотельной ячейки, м³. Падение давления, вызванное внезапным расширением и сужением потока в соответствии с модификацией в пористых средах, представлено в виде:

$$h_{f2} = n \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2} \right) \frac{\rho v_s^2}{2g}, \quad (6)$$

где n – количество каналов; β – отношение диаметра сужения к расширению канала; v_s – средняя скорость потока, м/с; ρ – плотность, кг/м³. Для компенсации влияния несферических частиц на поток был введен коэффициент сферичности ϕ твердой частицы. Тогда модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля с учетом сферичности можно представить в виде:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{72\mu\tau(1-\varepsilon)^2 v_s}{D_p^2 \phi^2 \varepsilon^3} + \frac{3\tau(1-\varepsilon)\rho v_s^2 n \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2} \right)}{4\varepsilon^3 D_p \phi}, \quad (7)$$

где τ – извилистость; v_s – средняя скорость потока, м/с; μ – динамическая вязкость Па·с; ε – пористость.

Для верификации полученного уравнения 7, а также численных результатов выполнены натурные эксперименты по определению потерь давления потока в образцах TPMS. На рисунке 9 представлено сравнение результатов перепада давления, полученное по модифицированному уравнению и в рамках натурального эксперимента. Предложенное модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля продемонстрировало более высокую точность по сравнению с классическими моделями для пористых сред. На рисунке 9 также представлено сравнение результатов натурального эксперимента с результатами численного моделирования.

Установлено удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных, что подтверждает корректность применяемых численных моделей и обоснованность предложенного подхода к расчету гидравлических характеристик на основе модифицированного уравнения Хагена-Пуазейля. Предложенный подход позволяет перейти от локального анализа течения в элементарной ячейке к инженерной оценке гидравлических потерь в пористых вставках конечной длины.

Для оценки эффективности интенсификации теплообмена в канале с оребрением TPMS использовался классический критерий, основанный на аналогии Рейнольдса,

представленный в виде отношения $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ по сравнению с гладкими трубами. Результаты сравнения в виде этого критерия представлены на рисунке 10.

Критерий, основанный на аналогии Рейнольдса, растет на всем исследуемом диапазоне и превышает значение 1 при $Re > 630$.

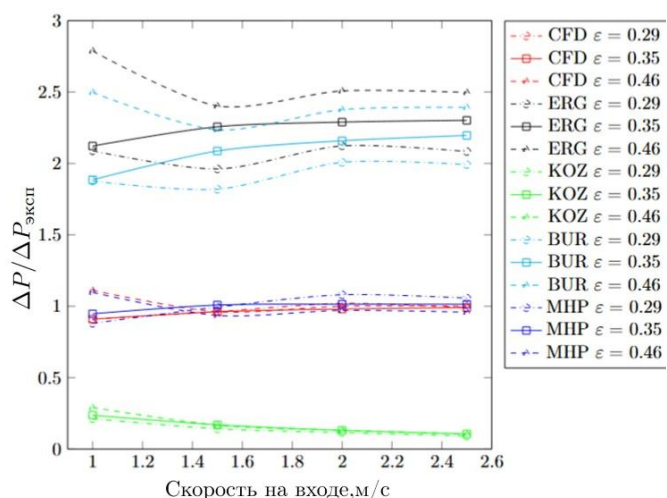


Рис. 9. Модель Эргуна, Козени-Кармана, Берка-Пламмера, модифицированного Хагена-Пуазейля для определения потерь давления в

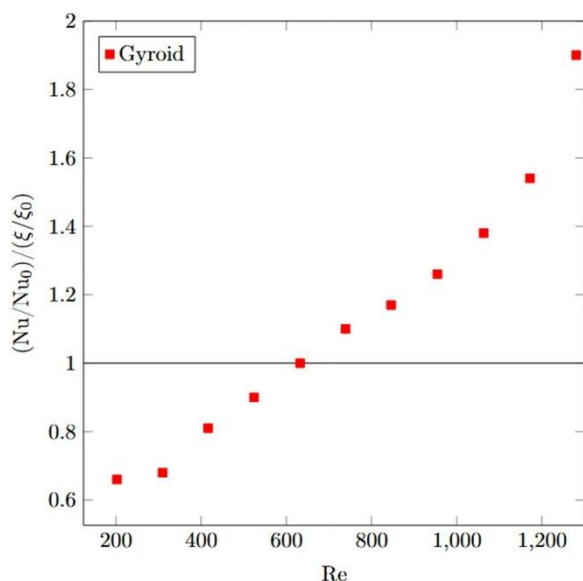


Рис. 10. Фактор аналогии Рейнольдса канала с оребрением для структуры G

устройстве на основе TPMS формируется как результат взаимодействия сложной структуры течения и развитой поверхности теплообмена.

Для сравнения эффективности теплопередачи в разработанном теплообменном устройстве также использовался критерий $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$. Результаты представлены на рисунке 12, из которого видно, что увеличение скорости потока в разработанном теплообменном устройстве приводит к значительному увеличению потерь давления, без существенного увеличения переданной энергии, т.к. в структуре даже на низких скоростях наблюдается завихрения, локальные ускорения и замедления потока.

В четвертой главе рассматриваются особенности теплопереноса в теплообменном устройстве, сформированном на основе TPMS-структур. В отличие от предыдущих глав, где основное внимание уделялось определению эффективных теплофизических и гидродинамических характеристик материала, в данной главе анализ проводится применительно к реальному теплообменному тракту с учетом пространственной структуры течения теплоносителя.

Постановка задачи теплообмена основывается на использовании геометрии теплообменного устройства, содержащего вставку из TPMS-структуры, через которую осуществляется протекание теплоносителя. На рисунке 11 представлена геометрия теплообменного устройства на основе TPMS типа Primitive, а также векторное распределение скорости внутри теплообменного устройства. Таким образом, теплопередача в теплообменном

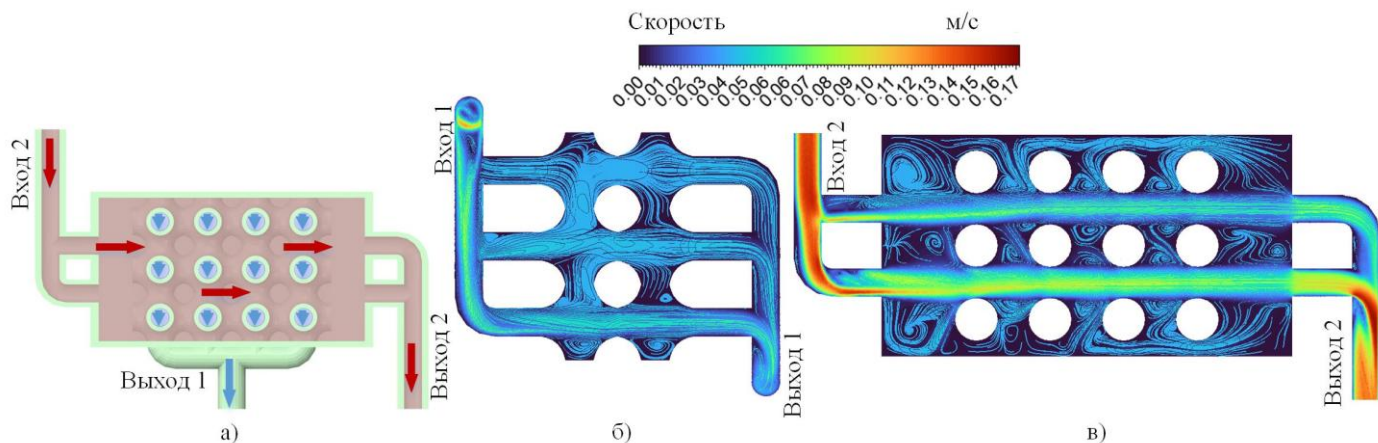


Рис. 11. Теплообменное устройство на основе поверхности Primitive: а) схема движения теплоносителя; б) векторное распределение скорости нагреваемого теплоносителя; в) векторное распределение скорости греющего теплоносителя

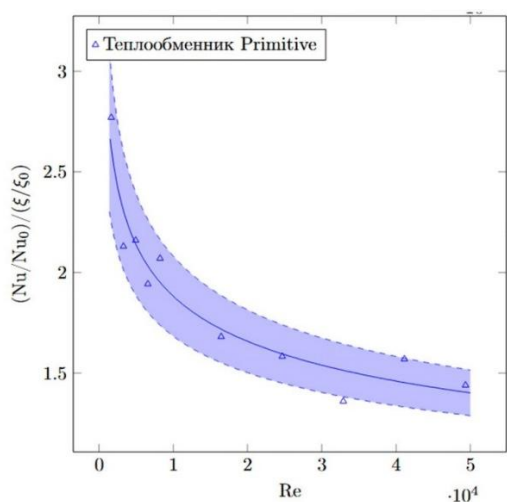


Рис. 12. Фактор аналогии Рейнольдса канала с оребрением для структуры G

Для экспериментального исследования теплопередачи была разработана лабораторная установка (см. рис. 13) и изготовлено теплообменное устройство на основе поверхности Schoen's I-WP посредством аддитивных технологий из материала AlSi10Mg.

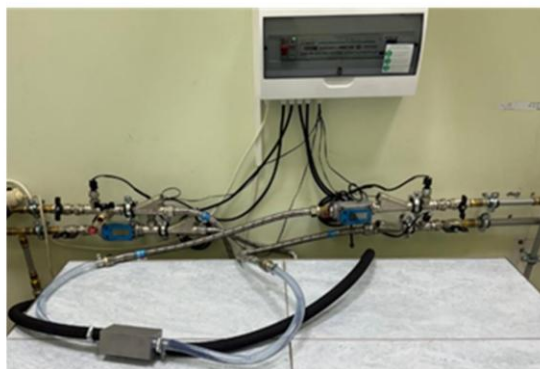
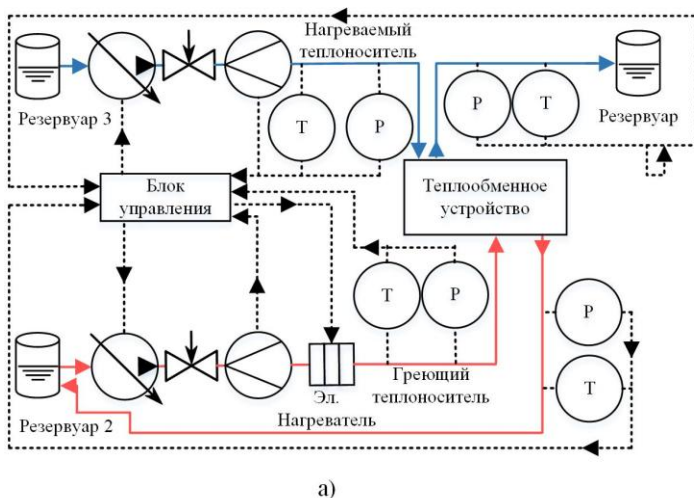


Рис. 13: а) схема лабораторной установки; б) лабораторная установка и TPMS-теплообменное устройство

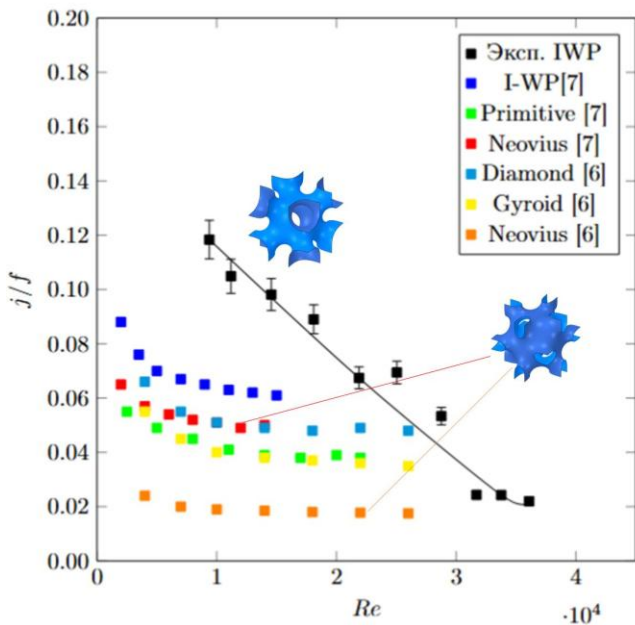


Рис. 14: Отношение коэффициентов j/f от Re полученные численными^{6,7} и натурными экспериментами

Сравнение результатов натурального эксперимента с данными независимых численных моделей для TPMS структур I-WP, Primitive, Neovius и Diamond показало, что при числах Re до 22000 структура I-WP демонстрирует наилучшее соотношение переданной тепловой энергии к потерям давления. По отношению к структуре Primitive превосходство структуры I-WP в указанном диапазоне чисел Re составляет до 143%, что свидетельствует о более эффективной реализации процессов теплообмена при сопоставимых потерях давления.

Полученные в работе результаты позволяют использовать ранее разработанные зависимости для расчета потерь давления и оценки теплопередачи в теплообменных устройствах на основе TPMS в инженерной практике. Использование TPMS-структур в теплообменных устройствах обеспечивает формирование сложной пространственной структуры течения теплоносителя, способствующей интенсификации теплообмена.

В приложениях приведены акты внедрения и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Основные выводы и результаты работы.

- Разработаны комплексные подходы определения теплофизических свойств и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой, основанная на анализе и обобщении результатов численных и натуральных экспериментов с использованием методов вычислительной гомогенизации, репрезентативной элементарной ячейки и нормализации по теплофизическим параметрам исходного материала. Предложенные подходы обеспечивает корректное обобщение экспериментальных и расчётных данных и расширяет возможности анализа материалов с упорядоченной структурой, а в частности, TPMS-структур, различной топологии и масштаба.

⁶ Xu H., et al. Flow and heat transfer performance of bionic heat transfer structures with hybrid triply periodic minimal surfaces // Applied Energy. 2023. Vol. 351. P. 121847.

⁷ Wang J., et al. Investigation on flow and heat transfer in various channels based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) // Energy Conversion and Management. 2023. Vol. 283. P. 116955.

•Получены обобщённые зависимости эффективной теплопроводности пористых TPMS-материалов от геометрических параметров элементарной ячейки и теплофизических свойств материала каркаса. Показано, что введение безразмерных параметров позволяет описывать теплофизические свойства материалов с различной топологией TPMS в унифицированной форме.

•Выполнено численное и экспериментальное исследование гидродинамических характеристик пористых материалов на основе TPMS, включая распределения скоростей и давления, а также потери давления при течении теплоносителя. Установлено, что сложная топология порового пространства приводит к формированию неравномерных векторных полей скорости и оказывает существенное влияние на величину гидравлического сопротивления.

•Предложено модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля для расчёта потерь давления при течении жидкости через пористые материалы с упорядоченной макроструктурой, учитывающее параметры потока и геометрические характеристики структуры. Показано, что предложенная зависимость обеспечивает более точное описание гидравлических потерь по сравнению с классическими моделями для пористых сред.

•Разработаны и исследованы теплообменные устройства на основе TPMS структур, для которых выполнен анализ безразмерных характеристик с учетом взаимосвязи процессов теплообмена и потерь давления. Показано, что особенности пространственного распределения скорости в TPMS теплообменных трактах оказывают определяющее влияние на характер теплопередачи.

•Результаты численных исследований верифицированы комплексом натуральных экспериментов, что подтвердило корректность применяемых численных моделей, разработанных подходов и предложенных обобщённых зависимостей. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании материалов с заданными теплофизическими характеристиками.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

В научных изданиях из перечня ВАК:

- [1] Брагин, Д.М., Еремин А.В. Исследование эффективной теплопроводности материалов, основанных на трижды периодических минимальных поверхностях типа Diamond, Gyroid, Fisher-Koch S// Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2025. – № 1. – С. 31-47.
- [2] Брагин, Д.М., Мустафин, Р.М., Попов, А.И., Зинина, С.А., Еремин, А.В. Исследование аэродинамических процессов в пористых материалах на основе трижды периодических минимальных поверхностей //Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26. – №. 5. – С. 66-78.
- [3] Брагин, Д.М., Еремин, А.В., Попов, А.И., Шульга А.С. Метод определения коэффициента эффективной теплопроводности пористого материала на основе минимальной поверхности типа Schoen's I-WP(R) // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2023. – № 2. – С. 61-68.

- [4] **Брагин, Д.М.**, Мустафин, Р.М., Зинина, С.А., Попов, А.И., Еремин, А.В. Численное исследование характеристик теплопередачи теплообменника на основе трижды периодической минимальной поверхности Primitive // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2025. – № 6. – С. 57-78.
- [5] **Брагин, Д.М.**, Еремин, А.В. Исследование тепловых свойств пористых полимерных материалов на основе минимальных поверхностей Шварца // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 9(105). – С. 619-634.
- [6] **Брагин, Д.М.**, Попкова, А.С., Еремин, А.В. Исследование теплофизических свойств пористой пластины, основанной на топологии трижды периодической минимальной поверхности Schwarz' CLP // Известия Российской академии наук. Энергетика – 2026. – № 3. – С. 52–67.
- [7] Попов, А.И., **Брагин, Д.М.**, Зинина, С.А., Еремин, А.В. Определение теплопроводности материала с упорядоченной структурой, основанной на трижды периодической минимальной поверхности Шварца P, с учётом конвекции // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 39-45.

[8] Еремин, А.В., Зинина, С.А., **Брагин, Д.М.**, Попов, А.И. Об одном методе исследования процессов теплопереноса в пористых средах с упорядоченной макроструктурой // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2026. – Т. 26, – №.2. – С. 211–224

В научных изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science:

- [9] **Bragin, D.M.**, Popov, A.I., Eremin, A.V. The thermal conductivity properties of porous materials based on TPMS // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Vol. 231. – P. 125863.
- [10] **Bragin, D.M.**, Popov, A.I., Eremin, A.V. Thermal conductivity of porous materials with Schoen's I-WP(R) TPMS structure // International Journal of Thermal Sciences. – 2025. – Vol. 218. – P. 110138.
- [11] **Bragin, D.M.**, Karpilov, I.D., Pashchenko, D. Flow dynamics through cellular material based on a structure with triply periodic minimal surface // Chemical Engineering Science. – 2024. – Vol. 298. – P. 120291.
- [12] **Bragin, D.M.**, Popov, A.I., Karpilov, I.D., Zinina, S.A., Popkova, A.S., Eremin, A.V. Experimental and Numerical Investigation of the Thermophysical Properties of Lattices Based on Triply Periodic Minimal Surfaces // International Journal of Thermal Sciences. – 2026. . – Vol. 228. – P. 110979
- [13] Popov, A.I. **Bragin, D.M.** Eremin, A.V. Heat and mass transfer in TPMS-based porous media: Two-medium approach // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 253. – P. 127553.
- [14] Popov, A.I., Eremin, A.V., **Bragin, D.M.** Modeling and Measurement of Effective Thermal Conductivity of Materials Reinforced with Bars / A. Popov, A. Eremin, D. Bragin // International Journal of Thermophysics. – 2023. – Vol. 44, No. 2. – P. 17.
- [15] Eremin, A.V., Frolov, M.A., Krutov, A.F., Smolkov, M.I., Shulga, A.S., **Bragin, D.M.**, Popov, A.I. & Blatov, V.A. (2024). Mechanical properties of porous materials based on new triply periodic and minimal surfaces // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2024. – Т. 31. – №. 29. – С. 11320-11336.

В других изданиях:

- [16] **Брагин, Д.М.**, Еремин, А.В. Зинина, С.А. Study of temperature distribution and effective thermal conductivity in TPMS structure // Third Asian Conference on Thermal Sciences 3 rd ACTS June 23-27, 2024, Shanghai, China – 2024. – С. 760-761.
- [17] **Брагин, Д.М.** Анализ толщины неэффективной изоляции труб // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2022. – № 7(247). – С. 56-59.

Список программ для ЭВМ, зарегистрированных в Роспатенте:

- [18] Попов, А.И., **Брагин, Д.М.**, Еремин, А.В., Зинина, С.А., Олатуйи, О.Д., Мустафин, Р.М., Карпилов, И.Д. Определение коэффициента эффективной теплопроводности пористых материалов с упорядоченной структурой на основе экспериментальных данных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616948 от 04.04.2023г.
- [19] Шадымов, Н.А., Шадымова, А.О., Еремин, А.В., **Брагин, Д.М.**, Зинина, С.А. Программа, реализующая алгоритм решения TPMS структур на основе трехмерной координатной сетки Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684779 от 21.10.2024
- [20] Зинина, С.А., Попов, А.И., Еремин, А.В., **Брагин, Д.М.**, Мустафин, Р.М., Кечин, Н.Н. Приближенно-аналитический метод решения задачи теплопроводности в пористой пластине, структура которой основана на трижды периодических поверхностях минимальной энергии. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684550 от 16.11.2023

Подписано в печать 25.06.2026 г. Печать плоская. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. __. Тираж 100. Заказ № _____.
Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, корпус 8.